

Измерение поверхностного распределения длины волны узкополосного излучения колориметрическим методом

А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов

Предложен способ определения длины волны узкополосного светового излучения по цифровой фотографии излучающей поверхности. Используемая фотокамера должна быть определенным образом откалибрована. Точность определения длины волны лучше 1 нм. Проверка проведена на желтом дублете ртути спектра и на примыкающем участке сплошного спектра излучения лампы накаливания. С помощью предложенного метода изучена степень однородности набухания голографических сенсоров как в стационарном состоянии, так и в динамике.

Ключевые слова: колориметрия, определение длины волны, цифровой фотоаппарат.

При работе с голографическими сенсорами возникает необходимость определения степени набухания голографического слоя в различных точках [1–3]. Сенсор представляет собой голограмму Денисюка, записанную в гидроделевой полимерной матрице. Эта структура эффективно отражает свет, длина волны которого в среде равна удвоенному периоду интерференционных слоев. Таким образом, измеряя спектр отражения, мы по положению максимума линии отражения определяем период интерференционных слоев. В матрицу встроены химические группы, делающие ее чувствительной к параметру раствора (например, к кислотности среды) или к тому или иному веществу (например, к глюкозе). Под действием этого вещества матрица сенсора сжимается или набухает, в результате чего изменяется расстояние между слоями рассеивающих частиц. Это приводит к тому, что при освещении голограммы белым светом изменяется длина волны отраженного от нее излучения. При однородной структуре голограммы, когда отражающие слои расположены равномерно и их число N достаточно велико, отраженное излучение сосредоточено в узком спектральном диапазоне. Если отражение от голограммы мало (т. е. пропускание близко к единице), несложно получить выражение, связывающее эффективную оптическую толщину D голографического слоя и спектральную ширину $\delta\lambda$ отраженного излучения на половине высоты: $\delta\lambda = 0.886\lambda^2/(2nD) = \lambda/N$, где n – показатель преломления эмульсии. При толщине голограммы 10 мкм, показателе преломления 1.33, длине волны 550 нм (при этом $N \sim 55$) спектральная ширина составляет ~ 10 нм.

Таким образом, задача сводится к следующему. Пусть на плоскости имеется набор излучателей. Нужно получить данные о спектре каждого из них, причем, желательно, одновременно. Сделать это довольно сложно, особенно когда источники расположены плотно, составляя сплош-

ную излучающую поверхность. Ситуация изменится, если излучение в каждой точке поверхности узкополосно. Тогда распределение средней длины волны излучения по поверхности можно найти колориметрическим методом. Для этого в каждой точке поверхности следует определить с необходимым разрешением значения трех компонент цветового вектора, т. е. получить цветное изображение исследуемой поверхности. В настоящее время решение этой задачи с помощью цифровой техники не представляет принципиальных проблем. Цель данной работы – решить ее с помощью обычных цифровых фотоаппаратов. Каждый пиксель цифрового изображения дает определенный цветовой вектор в системе RGB. Чтобы по изображению найти распределение средней длины волны, нужно знать, как конкретный фотоаппарат отображает излучение с различными длинами волн.

Предложенный для нахождения этого распределения колориметрический способ [1] состоит в следующем. Излучение направляют не менее чем в два регистрирующих канала с различающимися спектральными чувствительностями. Если в некотором спектральном диапазоне (назовем его рабочим) отношение спектральных чувствительностей по крайней мере двух каналов носит монотонный характер, то по отношению величин сигналов в этих каналах можно определить среднюю длину волны узкополосного излучения (рис.1). При селективной чувствительно-

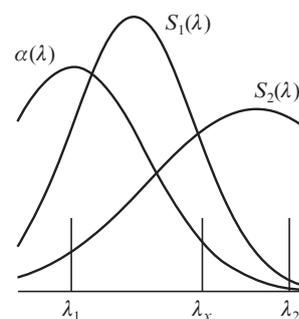


Рис.1. Качественный вид спектральных чувствительностей $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ рабочих каналов и их отношение $\alpha(\lambda)$; λ_1 и λ_2 – границы рабочего диапазона, λ_x – длина волны монохроматического источника излучения.

А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kraiskis@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 29 января 2010 г., после доработки – 27 мая 2010 г.

сти i -го канала $S_i(\lambda)$ его сигнал $I_i = \int d\lambda S_i(\lambda) \Phi(\lambda)$, где $\Phi(\lambda)$ – яркость источника. Для δ -образного по спектру источника с яркостью Φ_0 , излучающего на длине волны λ_x , сигнал в этом канале $I_i = \Phi_0 S_i(\lambda_x)$. Если отношение спектральных чувствительностей двух выбранных каналов $\alpha(\lambda)$, то искома длина волны – это решение уравнения $\alpha(\lambda_x) = I_1/I_2$:

$$\lambda_x = \alpha^{-1}(I_1/I_2),$$

где α^{-1} – функция, обратная $\alpha(\lambda)$. В случае, когда определяемая длина волны выходит за рабочий диапазон, т. е. за область монотонности отношения чувствительностей двух каналов, для однозначности определения длины волны нужно использовать дополнительный (третий) канал.

Вопрос для источника с конечной шириной спектральной линии не так прост, как для δ -образного источника. В нашем случае спектр отражения голографического слоя может уширяться вследствие ряда причин. Во-первых, из-за малого количества эффективно отражающих слоев, что обусловлено либо малой толщиной голографического слоя, либо малой глубиной проникновения излучения в слой вследствие сильного отражения из-за большой амплитуды переменной части показателя преломления или сильного светорассеяния. Во-вторых, уширение может происходить вследствие неоднородности периода слоев по глубине. Нас интересует набухание слоя, являющееся причиной изменения периода, о котором мы судим по положению максимума линии отражения. В последнем случае нам важно определить среднее значение периода слоев, связанное с некоторым средним значением длины волны. Достаточно очевидно, что при не слишком большом уширении эту величину можно также определить с помощью описанной выше процедуры, используя соотношения сигналов в различных спектральных каналах. Но в общем случае полученное таким образом значение периода, определенное по положению максимума в измеренном спектре отражения, будет отличаться от среднего значения периода. Смещение будет зависеть как от конкретной формы спектральной линии отражения, так и от спектральных чувствительностей каналов. Критерием допустимого уширения линии следует считать допустимое отличие определяемого среднего значения периода от реального среднего значения. Если в пределах ширины линии излучения, воздействующего на один пиксель приемной матрицы, чувствительность сенсоров практически не изменяется, то излучение фактически действует как монохроматическое. Если же в пределах ширины симметричной по форме линии спектральные чувствительности сенсоров изменяются линейно, то определяемый средний период слоев не изменится по сравнению с периодом в случае монохроматического источника. При нарушении этого условия в общем случае определяемая длина волны будет отклоняться от средней.

В литературе рассматривалась возможность измерения длины волны узкополосного излучения с помощью наборов сенсоров, при этом обсуждались только вопросы о их различной спектральной чувствительности [4, 5]. В нашей работе рассматривается не возможность создания нового прибора, а вопросы использования имеющихся фотоаппаратов и способы получения достоверной информации о распределении средней длины волны на поверхности источника по его цифровому изображению.

Для реализации колориметрического способа измерений в общем случае нужно получить проекцию исследуе-

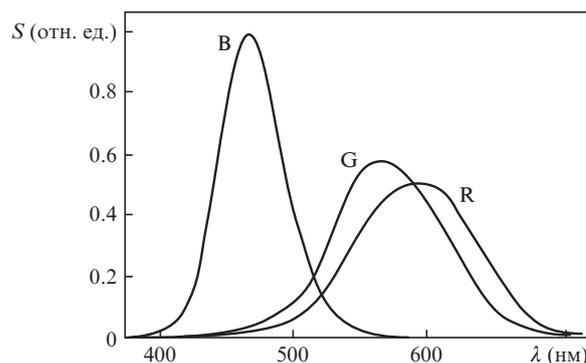


Рис.2. Спектральная чувствительность человеческого глаза: сигналы красного (R), зеленого (G) и синего (B) рецепторов [6].

мой поверхности на регистрирующую матрицу через два (а для расширения диапазона – через большее количество) типа светофильтров, т.е. создать колориметрический прибор с достаточным пространственным разрешением (каким и является цифровой фотоаппарат).

На рис.2 показаны кривые спектральной чувствительности трех типов колбочек глаза, ответственных за распознавание цветов [6]. Цифровой фотоаппарат также различает цвета, но спектральная чувствительность его сенсоров несколько иная. Например, как будет показано ниже, в спектральном диапазоне 540–575 нм фотоаппарат совершенно не чувствует изменения цветового тона.

На рис.3 представлены распределения сигналов цифровой фотографии спектра лампы накаливания для красных (R), зеленых (G) и синих (B) сенсоров фотоаппарата Sony F717; спектр получен с помощью спектрографа с дифракционной решеткой (~800 штр./мм). Этот, а также все последующие результаты были получены при чувствительности ISO 100 и отключенном автоматическом балансе белого. Если спектр измеряемого излучения находится в пределах одного из двух отмеченных рабочих интервалов, то фотоаппарат пригоден для измерений. Отметим, что мы исследовали около десяти различных фотоаппаратов, и оказалось, что спектральные характеристики их сенсоров качественно одинаковы. На рис.4 показано, как отображается сплошной спектр (цветовой тон), полученный цифровыми фотоаппаратами разных марок.

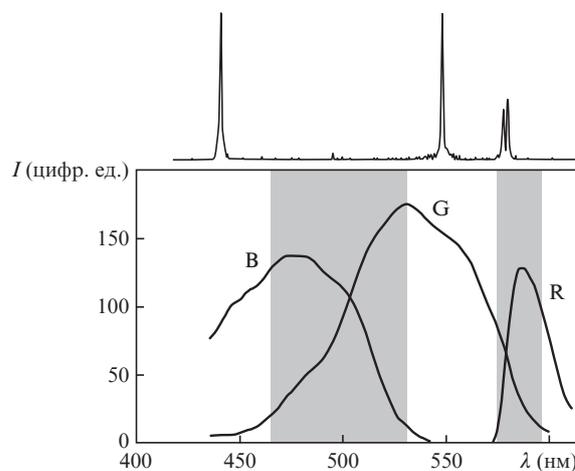


Рис.3. Спектр ртутной лампы (вверху) и сигналы красного (R), зеленого (G) и синего (B) сенсоров фотоаппарата, полученные из цифровой фотографии спектра лампы накаливания (внизу). Выделены рабочие диапазоны длин волн.

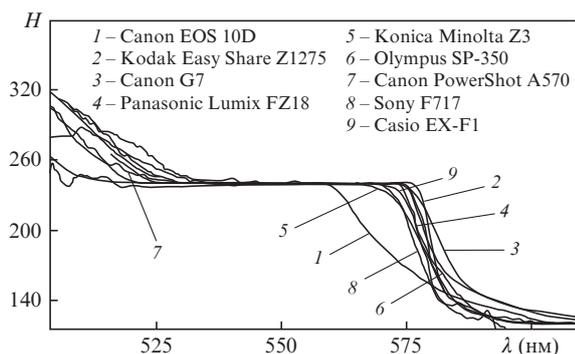


Рис.4. Зависимости цветового тона H от длины волны для некоторых марок цифровых фотоаппаратов.

Однако нашей целью не было изучение характеристик конкретных фотоаппаратов, мы хотели составить представление о ситуации в целом. Подробно исследовался только основной, рабочий фотоаппарат Sony F717. Фотографировался спектр лампы накаливания с добавленными для градуировки линиями ртутной лампы. Снимки, использованные для сравнения, не были переэкспонированными, т.е. максимальные значения сигналов в каналах не превышали 150–200 цифр. ед. (максимальный сигнал – 255 цифр. ед.).

Цветовой тон H определялся обычным образом, как полярный угол в цилиндрической системе координат трехмерного цветового пространства, и принимал значения от 0 до 360. Для удобства работы в области красных, желтых и зеленых цветов начало отсчета цветового тона мы выбрали в синей области ($H = 0$ при $R = 0, G = 0, B = 255$). При этом разрыв цветового тона (0–360) приходился на область синих тонов и не создавал дополнительной сложности при обработке результатов. Чистому красному цвету ($R = 255, G = 0, B = 0$) соответствует $H = 120$, чистому зеленому цвету ($R = 0, G = 255, B = 0$) отвечает $H = 240$. Более подробный анализ различных фотоаппаратов интересен, но выходит за рамки настоящей работы. Во всяком случае, самую общую информацию можно получить из рис.4. Основной, важный для нашей работы вывод состоит в том, что у всех фотоаппаратов, которые мы исследовали, имеется дефект цветовой чувствительности в зеленой области.

Некоторые современные фотоаппараты позволяют извлекать необработанные данные, т.е. получать фотографии в RAW-формате. Предварительные эксперименты показали, что ситуация с цветовой чувствительностью в этом случае улучшается, т.к. при представлении в этом формате процессор фотоаппарата не вносит искажений в данные, но для использования RAW-формата необходимы отдельные исследования. На первом этапе мы ограничились исследованием простейших (массовых) форматов (JPEG, BMP) по следующим причинам. Поскольку предполагалось создание голографических сенсоров для массового потребителя, наша цель заключалась в разработке простого способа не только проверки качества сенсоров, но и считывания с них данных. Способ должен быть доступен любому потребителю, т.е. должен ориентироваться на самые простые типы фотоаппаратов, в которых RAW-формат в настоящее время отсутствует. Кроме того, обработка изображения поверхности голографического сенсора должна быть максимально упрощена.

Была разработана процедура своего рода спектральной градуировки фотокамеры, т.к. соотношение откли-

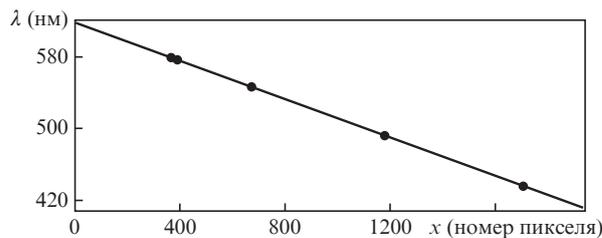


Рис.5. Градуировочная кривая фотокамеры, связывающая горизонтальную координату (номер пикселя) снимка и длину волны в спектре излучения лампы накаливания. Точками отмечены длины волн линий ртутного спектра, использованных для калибровки.

ков трех типов сенсоров приемной матрицы довольно сложным образом зависит не только от длины волны падающего света, но и от экспозиции. Фотоаппаратом, который нужно отградуировать, с различной выдержкой снимается непрерывный спектр с наложенным на него спектром ртутной лампы. Затем с помощью этого спектра каждое изображение калибруется по длинам волн (рис.5). Калиброванные таким образом изображения далее обрабатываются совместно. В результате извлекается информация о связи длины волны и откликов сенсоров.

На рис.6 показано, как зависит цветовой тон изображения от длины волны излучения при разных значениях средней по цветовым каналам величины сигнала I в градациях серого в каждой точке изображения, который равен третьей части суммы сигналов трех цветовых каналов. Видно, что одна и та же длина волны при разных I может соответствовать разным цветовым тонам получаемого изображения. Это касается не только сильно переэкспонированных снимков, когда в пределе цвет вообще теряется ($R = 255, G = 255, B = 255$), но и снимков с нормальной экспозицией.

На рис.7 показаны зависимости сигналов в зеленом и красном каналах приемной матрицы фотоаппарата Sony F717, а также цветового тона от I при фиксированных длинах волн. Рассматривается диапазон 570–605 нм, в котором чувствительны красный и зеленый сенсоры. Сигнал в синем канале в этом диапазоне не превышает уровня шумов. Видно, что с увеличением среднего сигнала I сигналы сенсоров растут нелинейно, причем поведение зависимостей в значительной степени определяется длиной волны. Как следствие, цветовой тон с увеличением I изменяется. Вблизи границ диапазона (рис.7, *a* и *e*) при уве-

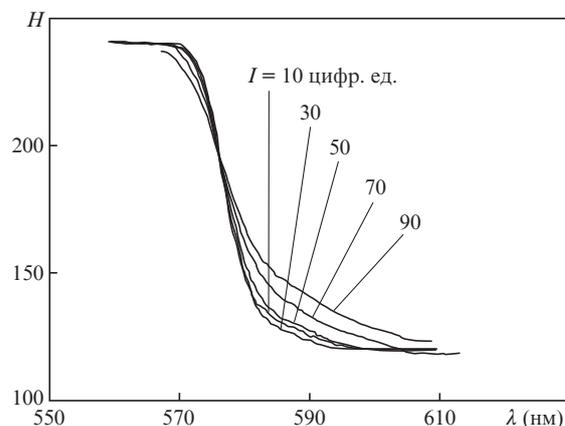


Рис.6. Зависимости цветового тона полученного изображения от длины волны излучения при разных средних значениях сигнала I .

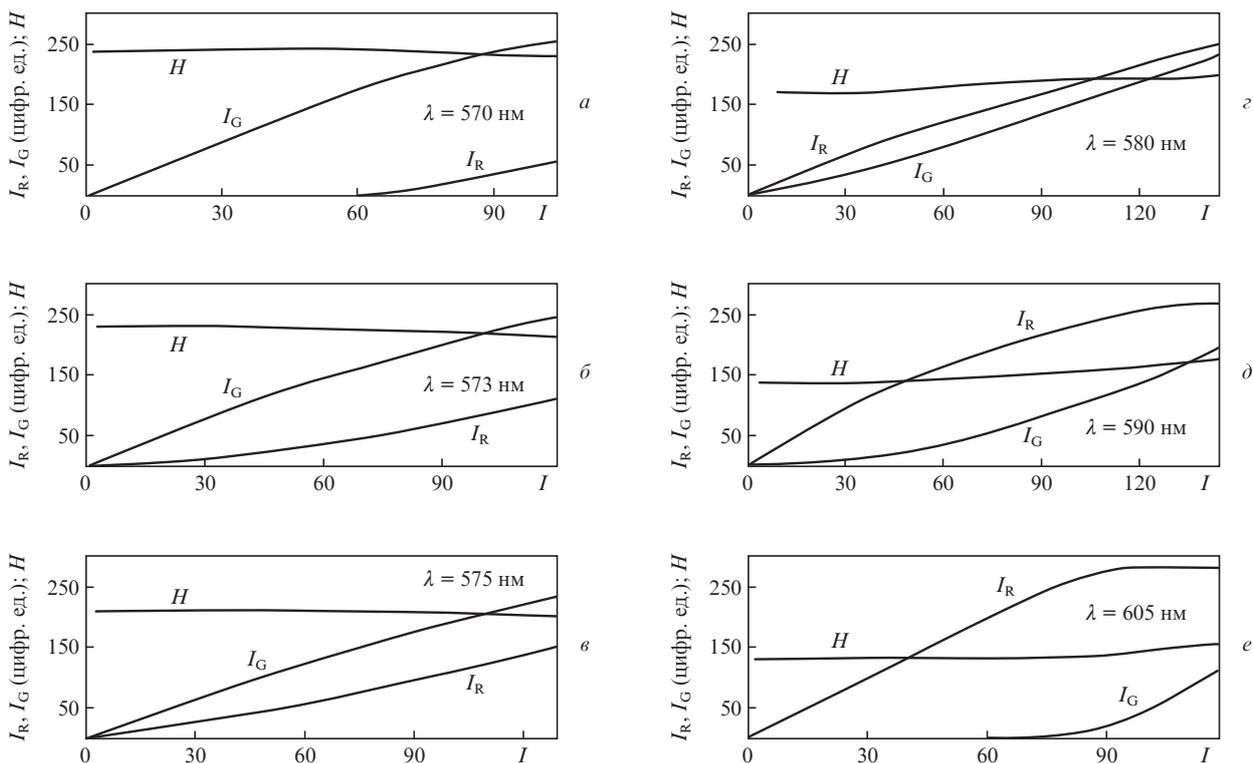


Рис.7. Зависимости величин сигналов в зеленом и красном каналах и цветового тона от средней величины сигнала I при фиксированных длинах волн.

личении I наблюдается своего рода пороговый эффект: отклик сенсоров с малой чувствительностью в данной области появляется только при достижении определенного значения I .

На основании всех полученных зависимостей для рабочего фотоаппарата строится характеристическая поверхность, дающая зависимость искомой длины волны от цветового тона и среднего значения I (рис.8). После построения характеристической поверхности фотоаппарат можно использовать как спектральный прибор в рабочем диапазоне длин волн и откликов сенсоров. Работоспособность метода была проверена на желтом дублете ртутного спектра и на сплошном спектре излучения лампы накаливания (рис.9).

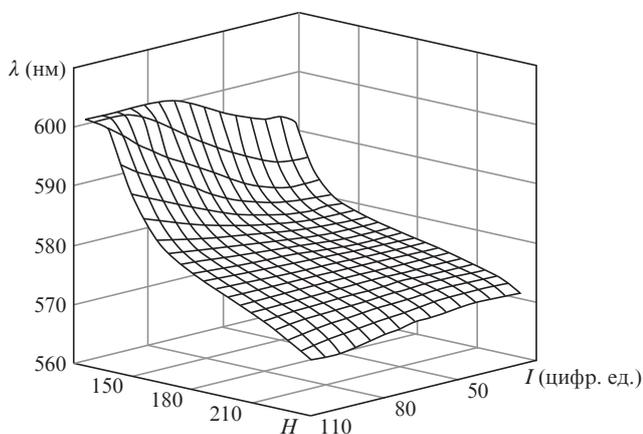


Рис.8. Характеристическая поверхность для фотоаппарата Sony F717. Определяемый диапазон длин волн 570–600 нм в области чувствительности красного и зеленого сенсоров.

После обработки фотографии спектра (на рис.9,а показана область, попадающая в рабочий диапазон длин волн) получается карта распределения длин волн по изображению (рис.9,б); при этом учитываются только области снимка, принадлежащие рабочему диапазону системы обработки. Исключены области со слишком малым значением I , в которых сигнал находится на уровне шумов, области со слишком большим I , где предположительно происходит значительное перераспределение сигналов между разными цветовыми каналами, а также области с близкой к нулю чувствительностью одного из двух сенсоров. Этим объясняется сложный контур карты распределения длин волн по изображению в области сплошного спектра. Интересно отметить, что на рис.9,а вследствие различных яркостей источников ясно видна область наложения ртутных линий и сплошного спектра. На карте распределения длин волн этого наложения не видно, что свидетельствует об одинаковом значении восстановленных длин волн для различных яркостей. На рис.9,в и г показаны распределения различных характеристик в горизонтальных сечениях снимка. Как известно, спектральный прибор с дифракционной решеткой обладает линейной дисперсией (см. рис.5), т. е. длина волны должна линейно изменяться с координатой (рис.9,з), тогда как цветовой тон изменяется нелинейно (рис.9,в). Колонки распределений (рис.9,д, е, ж и з, и, к) отвечают вертикальным сечениям снимка вдоль линий желтого дублета. На рис.9,д и з представлены отклики красных и зеленых сенсоров, изменяющиеся по координате в вертикальном сечении в соответствии с изменением I ; цветовой тон при этом, несмотря на постоянство длины волны, также изменяется (рис.9,е и и). Однако в вертикальных сечениях карты распределения длин волн, проходящих через линии ртутного спектра (579 и 577 нм), восстановленная длина

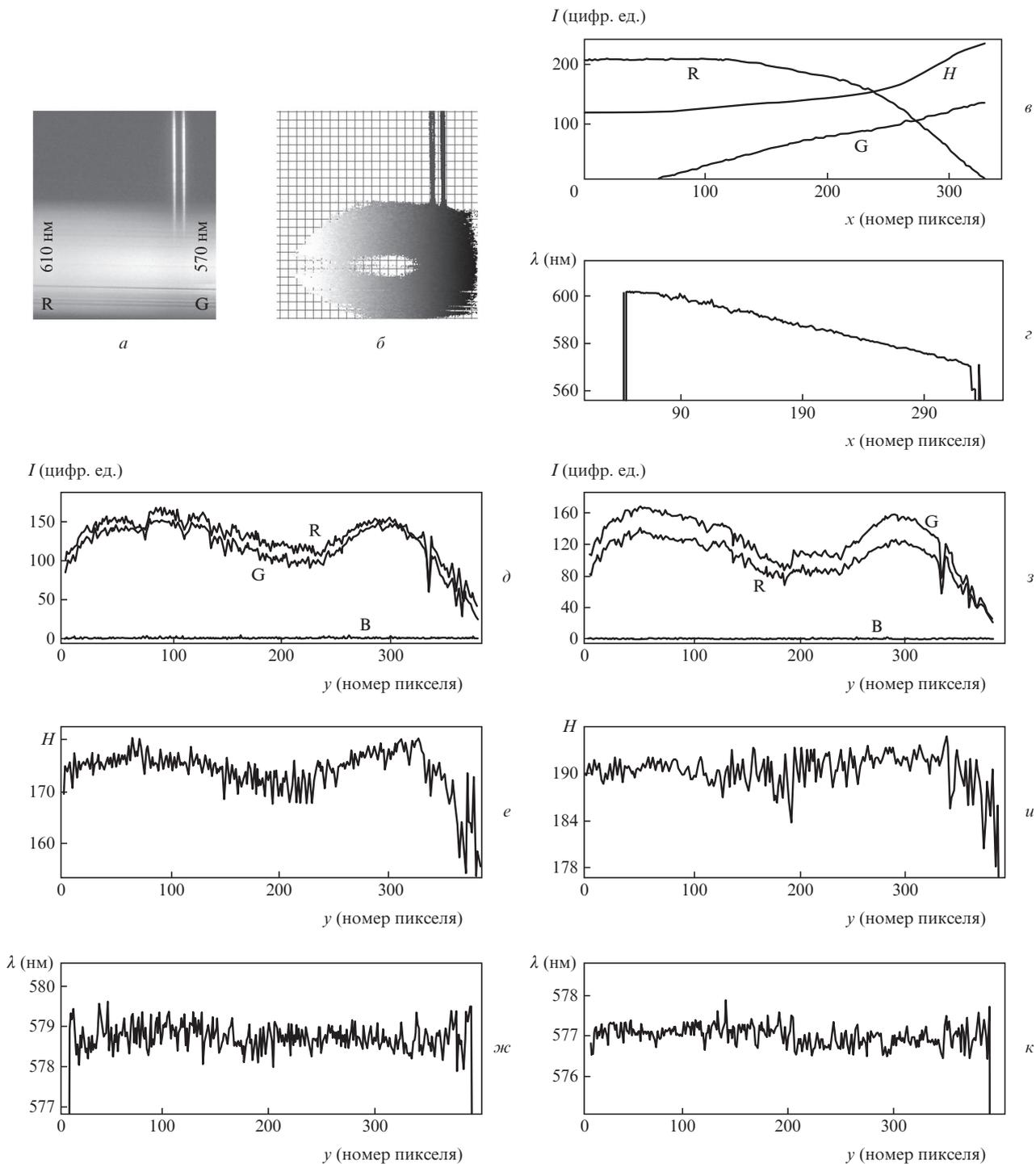


Рис.9. Иллюстрация к проверке работоспособности метода. Фотография участка спектра (а), карта распределения длины волны по изображению (б), распределения сигналов в красном (R) и зеленом (G) каналах и цветового тона (H) в горизонтальном сечении фотографии (в), горизонтальное сечение карты длин волн (z); распределения сигналов в цветовых каналах (д, з), цветового тона (е, и) и вычисленных длин волн (ж, к) в вертикальных сечениях фотографии вдоль линий ртутного дублета 579 нм (д, е, ж) и 577 нм (з, и, к). Квадратной штамповкой на карте длин волн отмечены области, сигналы в которых не попадают в рабочий диапазон и поэтому исключены из расчета.

волны постоянна с хорошей точностью в области как изображения линий, так и сплошного спектра (рис.9, ж и к).

По цифровому изображению ртутного спектра для обеих линий желтого дублета и находящегося под ним сплошного спектра определено среднеквадратичное отклонение восстановленной длины волны в пределах узкого окна, ориентированного вдоль центральной (по спектру) части линии ртути. Ширина окна составляла 4 пикселя и была меньше ширины линии. Его высота составляла

350 пикселей и перекрывала практически все изображение ртутной линии и весь соответствующий участок сплошного спектра. Для линий ртутного дублета получены длины волн 577 нм (среднеквадратичное отклонение 0.16) и 579 нм (среднеквадратичное отклонение 0.19).

Отметим, что для случая изображения ртутного спектра и сплошного спектра лампы накаливания на каждый пиксель действует практически монохроматический источник света, поскольку участок сплошного спектра, при-

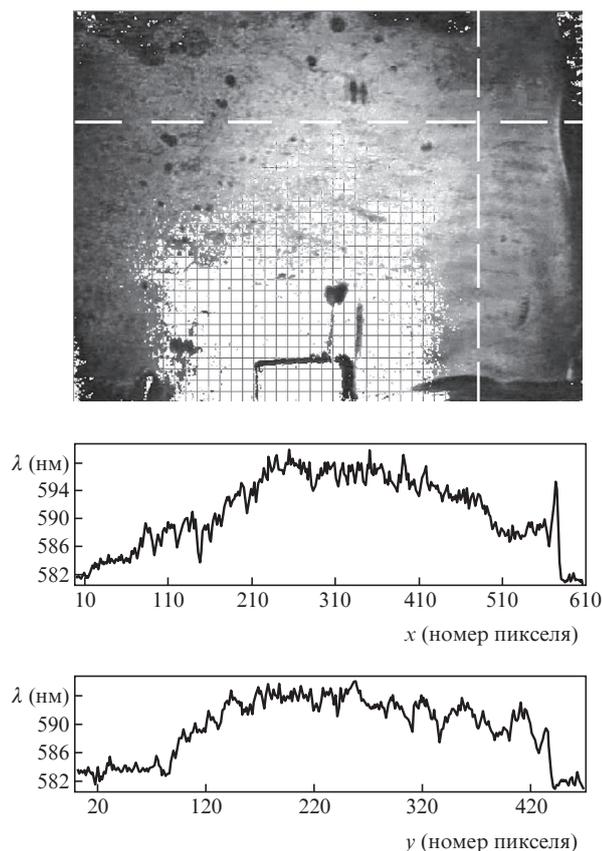


Рис.10. Карта распределения длин волн по изображению (а) и ее горизонтальное (б) и вертикальное (в) сечения для переходного процесса сжатия голографического слоя. Линии на фотографии указывают направления сечений.

ходящийся на один пиксель данного изображения, составляет менее 1 нм.

Разработанный метод применялся для исследования голографических сенсоров. Результаты представлены на рис.10–13. В случае голографического сенсора отраженное им излучение более широкополосно, и вопрос о возможных неточностях в определении длин волн требует специальных исследований. При этом надо иметь в виду, что при использовании голографического сенсора нам важно не абсолютное значение длины волны, а величина ее смещения под действием раствора, в который помещен сенсор.

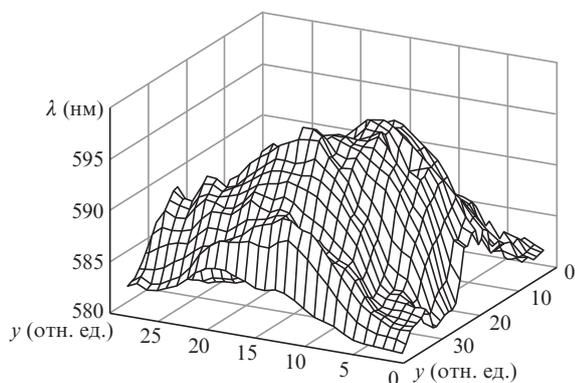


Рис.11. Изометрическое представление карты распределения длин волн (рис.10,а) в случае переходного процесса сжатия голографического слоя.

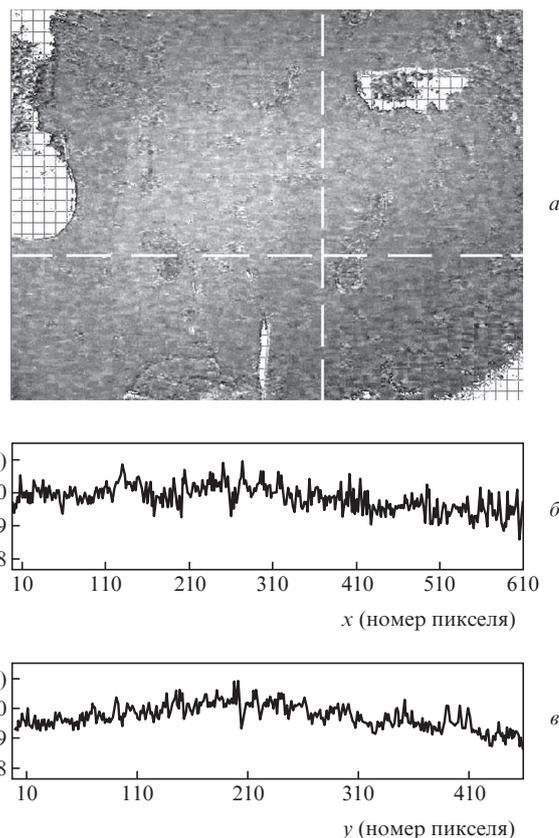


Рис.12. Карта распределения длин волн по изображению (а) и ее горизонтальное (б) и вертикальное (в) сечения для стационарного состояния сенсора. Линии на фотографии указывают направления сечений.

Данные, представленные на рис.10 и 11, относятся к переходному процессу. Голограмма, отражавшая изначально в красной области спектра, была опущена в раствор, обуславливающий ее сжатие. Сжатие является достаточно длительным процессом. Из рис.10, 11 видно, что в целом длина волны от краев к центру изменяется от 580 до 598 нм, т.е. разброс длин волн достаточно велик. Это говорит о том, что сжатие голограммы происходит неравномерно, и быстрее процесс протекает по ее краям. Также велик разброс длин волн в небольшой окрестности каждой точки распределения, и это свидетельствует о пространственной неоднородности деформации сетки полимерной матрицы этого сенсора.

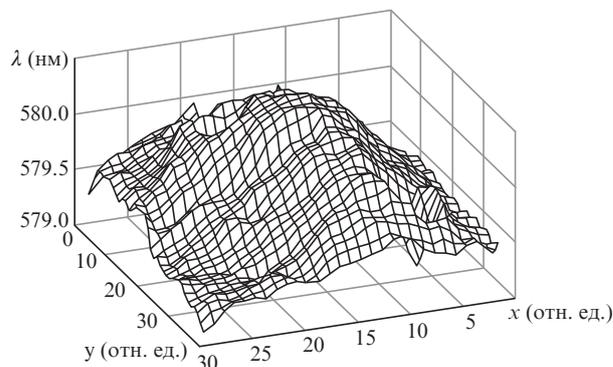


Рис.13. Изометрическое представление карты распределения длин волн (рис.12,а) для голограммы в стационарном состоянии.

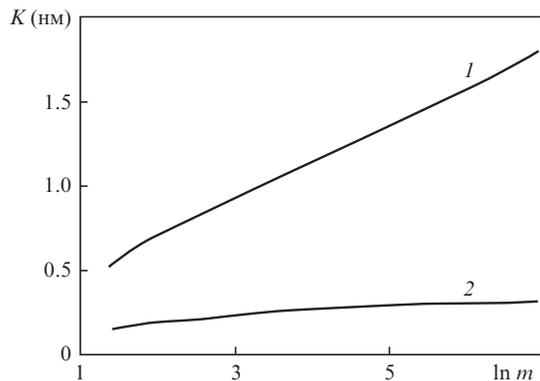


Рис.14. Зависимости среднеквадратичного отклонения в вычисленных длинах волн от числа точек в окне усреднения для переходного процесса (1) и для стационарного состояния сенсора (2).

Данные на рис.12 и 13 соответствуют стационарному состоянию голографического сенсора. На рис.12 показана карта распределения длин волн, рассчитанная по цветному цифровому изображению поверхности голографического сенсора. Внизу представлены два сечения этой карты. Видно, что по сравнению с переходным процессом разброс длин волн сильно уменьшился, и по всей поверхности сенсора он не превышает 2 нм. Так же сильно упал и локальный разброс, не превышающий 1 нм. Карта состоит из $\sim 500\,000$ точек.

О качестве голограммы и однородности процессов, происходящих при ее набухании, дает представление анализ их шумовых характеристик. На рис.14 показана зависимость среднеквадратичного отклонения в вычисленных длинах волн от размера окна усреднения. Среднеквадратичное отклонение длины волны от $\bar{\lambda}$

$$A_k = \sqrt{\frac{\sum_i^m (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{m}},$$

где λ_i – вычисленная длина волны в i -м пикселе фотографии, а m – число точек в окне усреднения, усреднялось по N точкам изображения, покрывающим всю исследуемую область сенсора. Параметр $K = N^{-1} \sum_k^N A_k$ будем называть величиной шумов. Данные, приведенные на рис.14, соответствуют изменению m от 4 до 2500 пикселей; среднеквадратичное отклонение усреднялось по области изображения размером 500×500 точек. При этом в переходном процессе в случае такого увеличения m среднеквадратич-

ное отклонение изменялось от 0.5 до 1.8 нм. Постоянный рост шумов с увеличением окна связан с крупномасштабной неоднородностью голограммы. В стационарном состоянии он составил 0.16–0.32 нм при том же значении m . Увеличение шумов на начальном участке зависимости обусловлено мелкомасштабными неоднородностями, выход на насыщение для больших m связан с отсутствием крупномасштабных неоднородностей. Отношение величины шумов в нестационарном состоянии к их величине в стационарном состоянии в этом диапазоне значений m растет с 3.4 до 5.6. Все это свидетельствует, во-первых, о довольно высокой однородности голограммы в стационарном состоянии и, во-вторых, о заметной неоднородности изменения набухания по ее поверхности.

Итак, в работе предложен метод измерения распределения средней длины волны узкополосного излучения по поверхности источника с помощью обычного цифрового фотоаппарата. Ограничения при использовании метода следующие: излучение должно быть узкополосным (определяется средняя длина волны); работа осуществляется в спектральной области, где чувствительны одновременно по крайней мере два типа сенсоров приемной матрицы (для большинства исследованных фотоаппаратов это интервалы 470–540 нм и 570–600 нм). Точность определения длины волны не хуже 1 нм. Метод проверен на желтом дублете ртутного спектра и на участке сплошного спектра излучения лампы накаливания, попадающем в рабочий интервал 570–600 нм. С помощью предложенного метода изучена степень однородности набухания голографических сенсоров как в стационарном состоянии, так и в динамике.

Работа поддержана грантом в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине».

1. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т., Постников В.А., Сергиенко В.И., Тихонов В.Е. *Способ измерения длины волны узкополосного светового излучения колориметрическим способом*. Заявка на получение патента РФ на изобретение от 21.05.2008, рег. №2008119917. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 09.02.2010 г.
2. Крайский А.В., Постников В.А., Султанов Т.Т., Тихонов В.Е. *Тез. докл. конф. «Фундаментальные науки – медицине»* (Москва, 2007, с. 79).
3. Крайский А.В., Постников В.А., Султанов Т.Т., Хамидулин А.В. *Квантовая электроника*, 40 (2), 178 (2010).
4. Патент Японии JP 2007 183 218 от 19.07.2007.
5. Патент Германии DE102006032857 от 17.01.2008.
6. Джадд Д., Вышецки Г. *Цвет в науке и технике* (М.: Мир, 1978).

ПОПРАВКА

В.А.Богачев, Н.В.Маслов, Ф.А.Стариков. Моделирование ОВФ лазерного излучения при нестационарном ВРМБ («Квантовая электроника», 2010, т. 40, № 4, с. 341–345).

В статье допущена ошибка – неправильно указан масштаб мощности на рис.6. Приводим исправленный рисунок.

